

Les particules élémentaires

La démocratie des hadrons, parfois étrange.

Parfums et couleur des quarks.

Courants neutres et charme : gipsy.

1) CLASSIFICATION DES INTERACTIONS ET ECHELLES D'ENERGIE.

Toutes les interactions ne sont pas encore connues à l'heure actuelle et certaines interactions de nature connue ne peuvent être décrites entièrement. Leur unification, en tout cas, n'est pas encore achevée. On distingue, comme l'indique le Tableau I, quatre types d'interactions qui diffèrent par leur intensité et leur portée (ou rayon d'action), dont les ordres de grandeurs sont si nettement séparés qu'on peut les associer à des domaines bien distincts, tels que premièrement la physique du noyau, deuxièmement celui des atomes, des molécules et des solides, c'est-à-dire le domaine de la vie, troisièmement celui de la radioactivité (β) ou quatrièmement celui de la cosmologie.

La description de l'interaction, au moyen du concept d'énergie (et non par la représentation d'un vecteur force) se développe en théorie des champs au moyen d'un hamiltonien. R. FEYNMAN a introduit une représentation en diagrammes dans lesquels l'interaction figure entre les particules « réelles » par une ligne ondulée à laquelle on associe un porteur virtuel de cette interaction, encore appelé « quantum du champ ». Tous ces porteurs sont des bosons, c'est-à-dire des particules de spin entier. Le plus connu est le photon γ virtuel, quantum du champ électromagnétique (\vec{E} , \vec{B}) de spin 0, dont la théorie, l'électrodynamique quantique, tout à fait au point, fournit avec une grande précision la valeur numérique de la constante de structure fine $\alpha = 1/137$, figurant l'intensité de cette interaction dans le tableau I. La portée infinie de cette interaction s'explique à l'aide de la relation de HEISENBERG, compte tenu de la masse nulle du photon.

L'interaction gravitationnelle, macroscopique comme la précédente, est décrite par le graviton de masse nulle de spin 2 (M^{me} TONNELAT, Congrès Solvay 1948) dont l'existence n'est pas davantage certaine que celle des autres porteurs, tels que Z, ou W inventé en 1938 par YUKAWA pour décrire l'interaction faible.

Quant aux interactions fortes, elles s'exercent entre particules appelées hadrons. Les leptons sont des particules non douées d'interactions fortes. (Lepton signifie « léger » compte tenu de leurs masses faibles par rapport à celles des hadrons.)

Les interactions fortes ont des porteurs appelés gluons, au nombre de huit (un octet). Le méson π , par exemple est un gluon que YUKAWA avait déjà prédit en 1935. Or, ce pion est un hadron, maintenant fortement agglutinés entre eux les nucléons d'un noyau. CHEW exprime ainsi l'absence d'aristocrate dans l'ensemble des hadrons en précisant que les hadrons forment une démocratie.

Toutes les particules ne sont pas soumises à toutes les interactions à la fois comme l'indique le tableau I. En particulier, par exemple, seuls les leptons chargés ($Q \neq 0$) sont intéressés par l'interaction électromagnétique.

Tableau I : Classification des interactions

| Nature | Intensité | Portée | Domaines | Porteurs (bosons) (quanta de champ) | Particules concernées |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| 1) Forte | 1 | 10^{-13} cm | physique nucléaire | 8 gluons π, ρ, \dots | hadrons |
| 2) Electromagnétique | $1/137 \sim 10^{-2}$ | macroscopique | chimie biologie | photon γ | hadrons leptons $Q \neq 0$ photons |
| 3) Faible | 10^{-5} | $\ll 10^{-13}$ cm | désintégration radio-active | W, Z | hadrons leptons |
| 4) Gravitationnelle | 10^{-39} | macroscopique | cosmologie | graviton | toutes |

Dans le tableau II, on a dressé, face à la physique des atomes, des noyaux et des particules, des énergies dont l'ordre de grandeur fait clairement comprendre le coût croissant de l'appareillage d'investigation. Ces strates énergétiques ont amené les physiciens chinois, s'inspirant de la pensée de MAO TSÉ TUNG, à prolonger par des « stratons » le tableau II ; mais on ne peut pas savoir si la division des « briques fondamentales » pourra se prolonger indéfiniment.

Tableau II : Echelles d'énergie et domaine d'application

| | | |
|------------|--------------|---|
| Atomes | ~ 1 eV | $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ |
| Noyaux | ~ 1 MeV | 10^{-13} cm |
| Particules | ~ 1 GeV | $10^{-14} \text{ à } 10^{-15} \text{ cm}$ |
| Quarks | 30 - 300 GeV | ? |

Les constituants des particules dites élémentaires ont été désignés par GELL-MANN sous le nom de quarks en 1964, se réfé-

rant à FINNEGAN'S WAKE de James Joyce (Viking Press New-York, 1939, p. 383). Ces quarks, non encore observés, pourraient être ponctuels, le parton, constituant du proton n'étant rien d'autre qu'un quark.

2) LES NOMBRES QUANTIQUES, LES SYMETRIES ET LES LOIS DE CONSERVATION.

Les liens entre les symétries d'un système et les lois conservatives correspondantes sont bien connues en mécanique analytique. On cite souvent à ce propos, le théorème plus récent de Emmy NOETHER (1918).

a) Les nombres quantiques ont été introduits pour expliquer les lois conservatives lors de l'interaction avec ou sans création ou annihilation de particules. On peut ainsi retenir les huit nombres quantiques suivants :

Q Charge électrique ; nombre entier dont l'unité correspond à la charge électrique du photon. (Les charges électriques des quarks — voir tableau V — seraient cependant fractionnaires).

B Nombre baryonique ou masse atomique (A) ; nombre entier dont l'unité correspond au nucléon (proton ou neutron). Les hadrons se subdivisent en mésons pour lesquels $B = 0$ et en baryons pour lesquels $B = 1$.

l Nombre leptonique : il est nul pour les hadrons, non nul pour les leptons. L'unité correspond à l'électron. Les leptons se distinguent par leur nombre muonique l_e et l_μ avec $l = l_e + l_\mu$.

Y Hypercharge, associé à deux autres nombres quantiques équivalents puisque en relation avec Y :

a) Charge moyenne $\bar{Q} = Y/2$; le classement des hadrons en multiplets (analogue à ceux de la physique atomique) de charges différentes permet de définir leur valeur moyenne \bar{Q} .

b) Etrangeté $S = Y - B$; la découverte de mésons lourds fut tardive à cause de l'importance de leur masse ; leur nom de méson étrange ($S \neq 0$) est dû à une durée de vie longue.

I Isospin ; les multiplets de hadrons ont approximativement même masse (il conviendrait d'appeler I isobare car I n'a rien à voir avec le spin) et se distinguent par la charge Q. Chaque multiplet est caractérisé par une même valeur de I. La multiplicité est $M = 2I + 1$. (Analogie atomique). L'opé-

rateur d'isospin étant vectoriel, on introduit sa projection suivant un axe, de valeur propre I_3 . Ce nombre quantique fut introduit par HEISENBERG en 1932 pour distinguer le neutron et le proton qui sont deux états de charge différente d'un nucléon.

- J Spin ; il s'agit du moment cinétique intrinsèque. Les bosons ont un spin entier, les fermions ont un spin demi entier.
- P Parité ; propriété intrinsèque d'une particule qui peut distinguer la gauche de la droite. P ne prend que les valeurs $+1$ ou -1 (paire ou impaire).
- G Isoparité ; elle n'est définie que pour les mésons, et correspond à la parité dans l'espace d'isospin.

D'autres nombres quantiques ont pu être introduits, tels que, par exemple, « peculiarness » $W = Q - I_3 - Y/2$ par AMATI, ainsi que ceux des quarks (couleurs et parfums) pour exprimer des lois conservatives. Ainsi « les gluons ne modifient pas le parfum » et « W et Z ne modifient pas la couleur » suivant qu'il s'agit d'interactions fortes ou faibles.

b) Opérateurs agissant sur les nombres quantiques, leur conservation.

On définit les opérateurs π T C liés aux symétries de l'espace et du temps, ou transformant une particule en son anti-particule. Ces trois opérateurs satisfont le théorème « π C T » de LÜDERS (1954) montrant que chaque opération prise séparément est moins fondamentale que l'ensemble du produit des trois opérations. On a pensé en 1964 que puisque certaines interactions faibles violeraient l'opération de renversement du temps, il devait exister une cinquième interaction .

- π Inversion d'espace : $\pi(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$. Les valeurs propres de cet opérateur sont $P = \pm 1$.
- T Renversement du temps : $T(t) \rightarrow -t$.
- C Conjugaison de charge : il s'agit de l'opérateur qui transforme les paramètres d'une particule en ceux de son anti-particule ; C laisse invariant M, J, I et la durée de vie τ mais change le signe de Q, B, I_3 , I_u et Y (et donc S). Le photon et le pion neutre sont leur propre anti-particule.

Le tableau III résume, suivant la nature de l'interaction, les lois de conservation que l'on peut énoncer pour divers nombres quantiques et les opérateurs ci-dessus.

Tableau III : Lois de conservation

| | P | C | T | PC | PCT | Q | ℓ | B | S | I |
|-------------------------------|---|---|-----|-----|-----|---|--------|---|---|---|
| Interaction forte | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Interaction électromagnétique | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Interaction faible | | | X ? | X ? | X | X | X | X | | |

c) Groupes de symétrie.

Trois groupes de symétrie notés SU 2, SU 3 et SU 4 (Groupe Spécial Unitaire d'ordre deux, trois et quatre) ont été utilisés jusqu'à présent pour exprimer les lois de conservation lors des transformations. Si le nombre quantique S doit être pris en considération du fait de l'existence des particules étranges Λ et K, on doit abandonner le groupe d'isospin SU 2 pour SU 3 et de même, si l'on doit tenir compte du « charme » des particules, SU 3 est remplacé par SU 4. La symétrie SU 2 est brisée par le champ électromagnétique qui a permis de distinguer neutron et proton, la symétrie SU 3 est brisée par le champ fort, permettant de distinguer des particules de masses différentes dans une même famille.

Les symétries sont à la base de la cinématique des processus c'est-à-dire qu'elles induisent les lois de conservation permettant de structurer l'univers des particules.

3) LE ZOO DES PARTICULES.

Le spin J permet de distinguer les bosons (J entier), dont le nombre n'est pas fixe puisqu'on peut en créer à volonté (ils sont « superposables »), et les fermions (J demi entier) dits « durs ».

l permet de distinguer les particules à interactions fortes (hadrons $l = 0$) des autres (leptons $l \neq 0$). Les leptons vont par couples (e, ν_e) (μ, ν_μ). Avec la découverte du lepton « lourd » τ , il faudra s'attendre à trouver le neutrino ν correspondant.

B classe les hadrons en mésons ($B = 0$) et en baryons ($B \neq 0$), pouvant être étranges ($S \neq 0$) ou non ($S = 0$). On a également précisé les deux états du nucléon N, le neutron n et le proton (chargé) se distinguant par $I_3 = +1/2$ et $-1/2$.

En théorie des champs, les bosons sont représentés par une fonction d'onde scalaire si $J = 0$, vectorielle si $J = 1$ et suivant la parité, on utilise soit un pseudoscalaire, soit un pseudovecteur (ou vecteur axial), les fermions de spin $1/2$ ayant les fonctions d'onde spinorielles.

Tableau IV : Classification des particules, avec exemples

| nom | symbole | Masse MeV/c ² | Durée de vie τ (s) | J | Q | $\ell_{e,u}$ | B | Y | S | I | I_3 | P | C |
|----------|------------|-----------------------------|----------------------------|-------|-----------|--------------|---|---------|---------|-------|-------|-------|---|
| photon | γ | 0 | ∞ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | - | - |
| pions | π^\pm | 139,58 | $2,5 \cdot 10^{-8}$ | 0 | ± 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | - | - |
| | π^0 | 134,97 | 10^{-16} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | - | - |
| | η | 548,8 | 10^{-13} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | - | - |
| | ρ | 770 | 10^{-23} | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | - | - |
| | ω | 782,7 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | - | - |
| | ψ | 3684 | 10^{-20} | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | - | - |
| | J/ψ | 3095 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | - | - |
| | D^0 | 1865 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $1/2$ | $1/2$ | - |
| | ... | | | | | | | | | | $1/2$ | $1/2$ | - |
| kaons | K^\pm | 493,7 | $1,2 \cdot 10^{-8}$ | 1 | 1 | 0 | 0 | ± 1 | ± 1 | $1/2$ | | - | - |
| | K^0 | 497,9 | $10^{-8} \pm 10^{-10}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | $1/2$ | | - | - |
| | ... | | | | | | | | | | | | |
| proton | N | 938,21 | ∞ | $1/2$ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $1/2$ | $1/2$ | + |
| neutron | n | 939,50 | 10^{-3} | $1/2$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $1/2$ | $1/2$ | + |
| delta | Δ | 1238 | | $3/2$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $3/2$ | $1/2$ | + |
| lambda | Λ | 1115 | $2,6 \cdot 10^{-10}$ | $1/2$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | + | + |
| sigma | Σ | ~ 1190 | $\sim 10^{-10}$ | $1/2$ | $\pm 1,0$ | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 1 | + | + |
| xi | Ξ | ~ 1315 | $\sim 10^{-10}$ | $1/2$ | -1,0 | 0 | 0 | 1 | -1 | -2 | $1/2$ | + | + |
| omega | Ω^- | 1680 | $1,3 \cdot 10^{-10}$ | $3/2$ | -1 | 0 | 0 | 1 | -2 | -3 | 0 | + | + |
| | ... | | | | | | | | | | | | |
| electron | e^- | 0,511 | ∞ | $1/2$ | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | + | + |
| neutrino | ν_e | # 0 | ∞ | $1/2$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | + | + |
| muon | μ^- | 105,65 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ | $1/2$ | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | + | + |
| neutrino | ν_μ | # 0 | ∞ | $1/2$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | + | + |

Interactions électromagnétiques

non étranges

mésons

étranges

kaons

hadrons

Interactions fortes

nucléons

non

étranges

baryons

hyperons

étranges

leptons

Interactions faibles (fa)

électromagnétiques (e.m)

(gravitationnelles)

Fermions, spin demi entier.

Bosons, spin entier.

On appelle résonance, les particules dont la durée de vie est inférieure à 10^{-22} s et on les note suivies d'une parenthèse comprenant leur masse en MeV/c² et J^{PG}, par exemple, $\rho(770,1-+)$ ou $N(1670,5/2-)$.

Les lettres grecques minuscules sont réservées de préférence aux pions (mésons $B = 0$) et les majuscules aux hypérons (baryons $B = 1$). Le tableau IV comprend la particule J/ψ à « charme discret » et la particule charmée D^0 découverte en 1976.

4) LES QUARKS ET LA CLASSIFICATION DES HADRONS DANS LE CADRE DE SU 4.

CHEW, GELL-MANN et ROSENFELD ont qualifié la population des hadrons de démocratie, faute d'aristocrate. Les gluons sont eux-mêmes des hadrons (ρ, π). La théorie du « bootstrap » (tirant de bottine du Baron de Crac, XVIII^{me} siècle) ou autoconsistance, émet l'idée que les hadrons fournissent eux-mêmes leurs forces existentielles. La dynamique des processus qui s'intéresse aux interactions entre particules montre que dans le régime hadronique, il y a une certaine équivalence entre les hadrons stables, les résonances et les « boules de feu » (firebal) massifs ; les interactions ont lieu dans une sorte d'amas (cluster) de structures dynamiques.

a) Une classification des hadrons en multiplets s'est établie dès 1959 par Tullio REGGE : les trajectoires de REGGE ; il remarqua que sur un graphique portant le spin J des hadrons en fonction de leur masse, les hadrons pouvaient être classés en familles d'éléments alignés sur des droites parallèles. En 1962, GELL-MANN a proposé une classification suivant la voie octuple (eightfold way, aphorisme bouddhique permettant de soulager la douleur par de bonnes vues, intentions, paroles, actions, vies, efforts, attentions et concentrations) basée sur les algèbres du norvégien Sophus LIE (XIX^{me} siècle), les familles de particules ayant même valeur de J^P.

b) La classification à l'aide des quarks, non encore observés, a évolué en parallèle avec l'utilisation des groupes spéciaux unitaires :

En 1964, GELL-MANN et ZWEIG, indépendamment, ont proposé un triplet de quarks u (up) d (down) s (strange) à charges fractionnaires dans le cadre de SU 3, reprenant le modèle de SAKATA $p n \lambda$ de 1956. u, d, s sont appelés maintenant parfums (ou saveur : flavor) de quarks.

GREENBERG, la même année, a ajouté à chaque parfum, une distinction par trois couleurs : bleu, jaune, rouge.

BJÖRKEN et GLASHOW ont alors proposé un quatrième parfum appelé charme c .

En 1965, HAN et NAMBU proposent trois triplets de quarks à charges entières dans le cadre $SU3 \times SU3$.

Enfin, en 1970, GLASHOW a proposé (tableau V), le modèle de 3 quartets de quarks parfumés et colorés, dans le cadre de $SU4$, avec les couples (ud) et (sc) correspondant aux couples de leptons (e, ν_e) et (μ, ν_μ) , auxquels il faut ajouter le couple de leptons (τ, ν_τ) et introduire deux autres parfums (t, b) . La résonance « upsilon » (9,46 GeV) est à beauté cachée : $b\bar{b}$.

Tableau V : Parfums de quarks, associés chacun à trois couleurs

| Quark | masse (GeV/c ²) | J | Q | B | Y | S | I ₃ | c |
|-------|-----------------------------|-----|------|-----|------|----|----------------|---|
| u | 0,338 | 1/2 | 2/3 | 1/3 | 1/3 | 0 | 1/2 | 0 |
| d | 0,336 | 1/2 | -1/3 | 1/3 | 1/3 | 0 | -1/2 | 0 |
| s | 0,540 | 1/2 | -1/3 | 1/3 | -2/3 | -1 | 0 | 0 |
| c | 1,5 | 1/2 | 2/3 | 1/3 | 1/3 | 0 | 0 | 1 |

La classification des hadrons dans le cadre de $SU4$ est donnée par la figure 1.

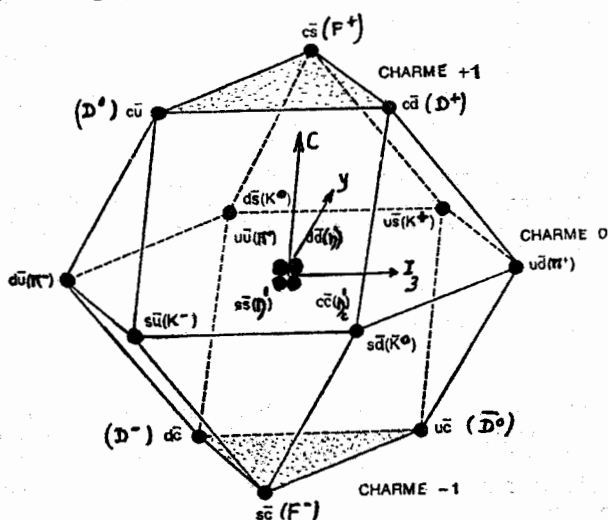
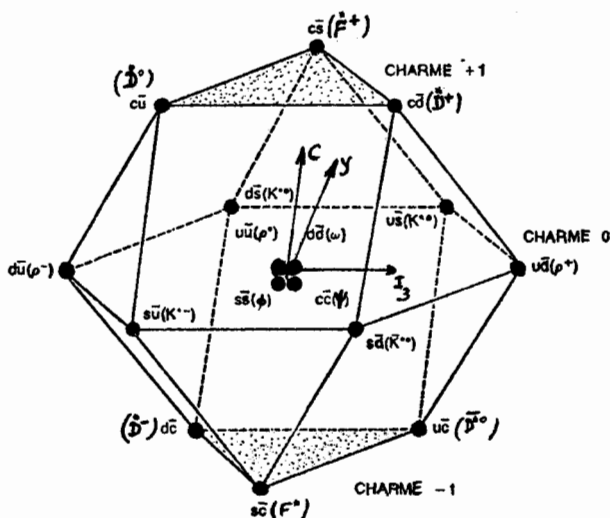


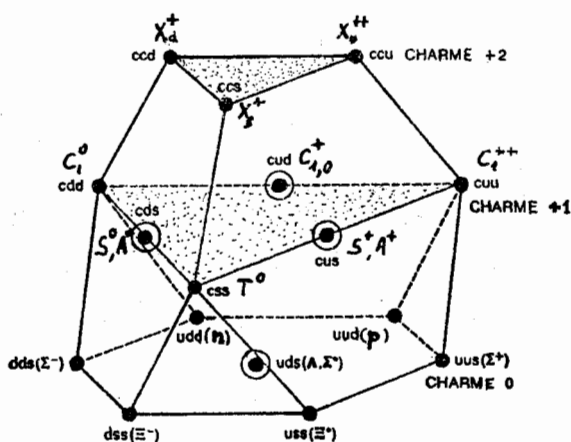
Fig. 1. — Familles de hadrons dans le cadre de $SU4$.

a) Mésons $J^P = 0^-$.

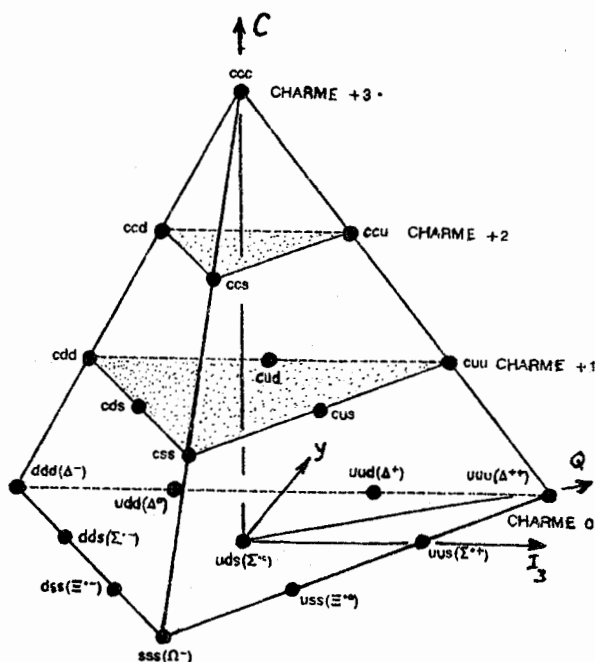
Les mésons sont formés à partir d'une paire quark, anti-quark $q\bar{q}$ (fig. 1 a) et 1 b), les baryons à partir de trois quark (fig. 1 c) et 1 d).



b) Mésons $J^P = 1^-$.



c) Baryons $J^P = 1/2^+$.

d) Baryons $J^P = 3/2^+$.

Le plan $C = 0$ ramène SU_4 à SU_3 avec ses octets et décuplets de particules et dans ce plan, on retrouve le classement dans le cadre de SU_2 où par exemple sur la figure 1 a) les trois pions π^0 et π^\pm diffèrent par leur nombre quantique I_3 ($S = 0$) de même K^0 et K^+ ($S = 1$) et K^- et K^0 ($S = -1$). Le rendez-vous avec gipsy, la particule J (désignation de TING)/ ψ (désignation de RICHTER, tous deux prix Nobel 1976) à charme discret (structure $c\bar{c} = 0$) se trouve dans la fig. 1 b), la particule D^0 à charme explicite, observée en 1976 par GOLDHABER et al., étant sur la figure 1 a). Depuis la découverte de ces particules, l'octet de mésons est devenu un décuplet ne cadrant plus avec la voie octuple pour mésons. Avec « upsilon » et l'introduction de b , cela se complique encore. Le lien entre quarks est expliqué par des instantons (voir 5, REBBI C.).

5) LES COURANTS ET LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN.

a) Le champ électromagnétique.

L'interaction coulombienne entre un proton et un électron se fait par échange de photons virtuels et constitue un courant

neutre : ces particules conservent leur charge avant et après l'interaction. En théorie des champs, l'hamiltonien contient pour cette interaction un opérateur vectoriel densité de courant dont la quadri-divergence est nulle (invariance de jauge). Le photon conserve la parité et le champ est renormalisable (on peut éliminer les divergences des calculs).

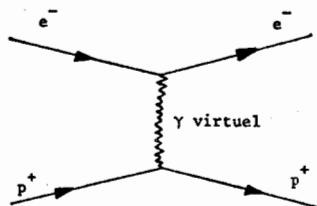


Fig. 2. — Courant neutre.

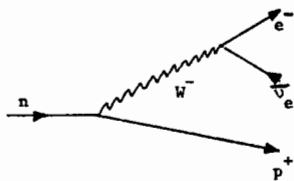


Fig. 3. — Courant chargé.

La figure 2 représente le diagramme de FEYNMAN de cette interaction. On représente par une ligne ondulée, le quantum du champ, la flèche indiquant le sens de déplacement de la particule, et lorsqu'il s'agit d'une anti-particule, la flèche est inversée et l'on dit qu'elle « remonte le temps ».

b) L'interaction faible : désintégration β .

La réaction peut s'écrire : $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$.

Le quantum de champ faible est W^- , le courant est chargé dans ce cas, le neutron se transformant en proton chargé. W viole la parité (voir aussi tableau III) et la théorie n'est pas renormalisable. La figure 3 est le diagramme de FEYNMAN correspondant à la désintégration β .

c) L'unification de la théorie des champs électromagnétique et faible.

C'est en 1967 que WEINBERG et SALAM ont proposé la théorie d'unification des champs faible et électromagnétique dont la possibilité de renormalisation a été établie en 1971 par Gerhard 't HOFFT.

L'analogie de l'action de photons énergétiques et de leptons fortement accélérés bombardant des protons a mis les théoriciens sur la voie de l'unification comme le montrent les quatre réactions suivantes, dont les diagrammes de FEYNMAN sont donnés par la figure 4 :

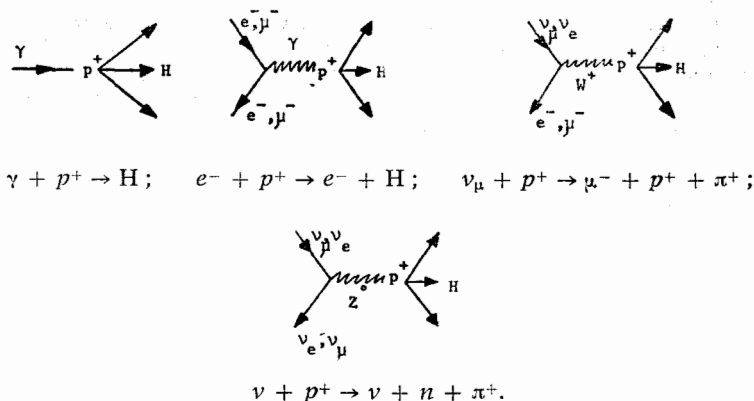


Fig. 4. — Interactions du photon et des leptons avec un proton.

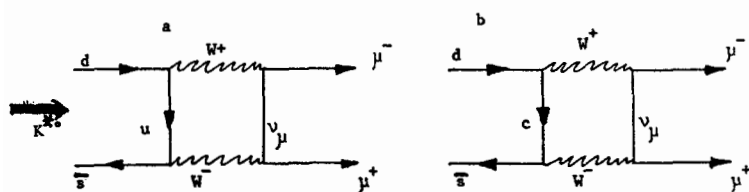
H désigne un ensemble de hadrons : les deux premiers processus, analogues, à courant neutre, sont des interactions électromagnétiques en partant de photons ou de leptons (car e peut être remplacé par μ). Le troisième processus est une interaction faible à courant chargé (μ^- pouvant aussi être remplacé par e^-) tandis que le dernier processus est un courant neutre prédit par la théorie unifiant le champ faible et électromagnétique. Il fut effectivement observé au C.E.R.N. en 1973.

6) COURANTS NEUTRES ET CHARME.

Le charme étant conservé par les interactions fortes et électromagnétiques, il faut, pour le découvrir, utiliser des particules qui ne sont concernées que par les interactions faibles. C'est ainsi que l'on utilise le courant neutre des neutrinos (produits pour la première fois à Batavia, au Fermilab). Néanmoins, la théorie et l'expérience, au départ, s'opposaient sur les conséquences des courants neutres et c'est grâce au charme, par l'élargissement de SU 3 à SU 4 que la situation s'est clarifiée.

a) Désintégration $K^{*0} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ non observée.

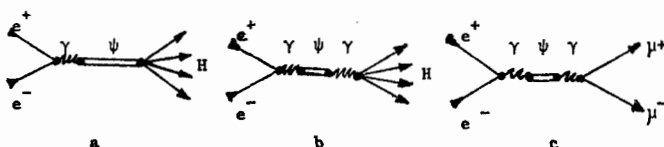
Théoriquement prévue, cette désintégration (avec changement d'étrangeté, voir tableau III) ne fut pas observée expérimentalement. En réalité, l'introduction du charme a montré que les deux probabilités de désintégration (fig. 5 a et b) se compensent et l'on peut noter que, en b, c'est grâce au charme qu'il y a compensation. Expérience et théorie sont donc tout à fait en accord dans le cadre de SU 4.

Fig. 5. — Désintégration du kaon K^{*0} .

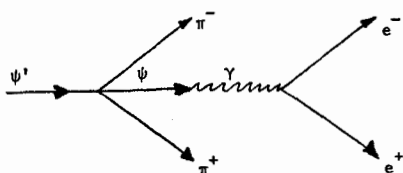
b) Etats du charmonium $c\bar{c}$ et particules charmées.

La production des particules à charme discret $\psi, \psi', \psi'', \psi''' \dots$ dans les anneaux de stockage peut être représentée par les diagrammes de la figure 6.

a correspond à la désintégration directe (1^{er} ordre), b et c correspondent au second ordre électromagnétique (voir B. RICHTER).

Fig. 6. — Diagrammes de Feynman de production de ψ .

Les hadrons recueillis en b peuvent être 3π ou $\Lambda\bar{\Lambda}$ ou $p\bar{p} \dots$. L'état excité ψ' se désintègre suivant le diagramme figure 7, et l'état ψ''' par exemple produit $D^0 \bar{D}^* \dots$

Fig. 7. — Désintégration de ψ' .

Enfin, il faut retenir que GOLDHABER et al. ont observé effectivement une particule charmée en 1976. Il s'agit de D^0 qui se désintègre en $K^- \pi^+$ ou $K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$. Quelques états du charmonium ont été représentés sur la figure 8. Il y a un foisonnement d'expériences et de découvertes de particules et de modes de désintégration qui peut préparer à bien des surprises : les particules sont l'objet de soins très attentifs et l'on peut espérer aboutir à l'unification des trois interactions, mais bien des questions sont encore sans réponse.

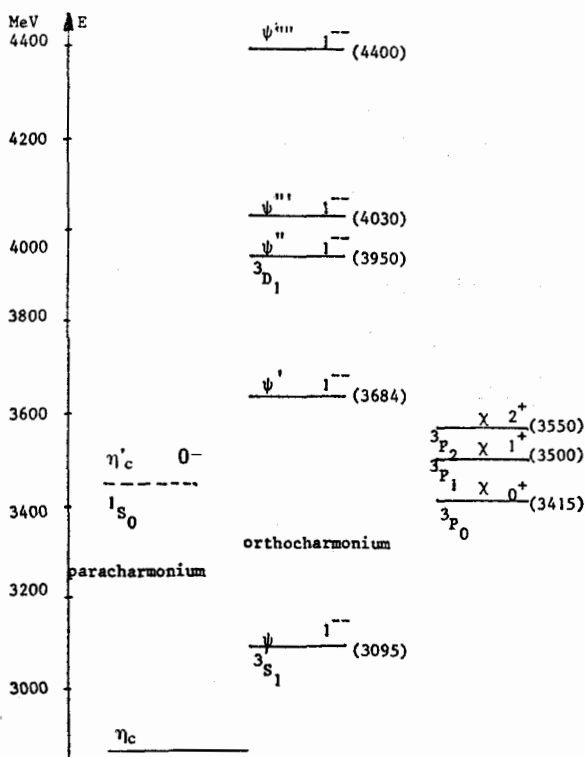


Fig. 8. — Etats du charmonium.

BIBLIOGRAPHIE

1) Bulletin de l'Union des Physiciens :

N° 507 (1968) p. 1181-1201, JACOB M. : *Les quarks*.N° 571 (1975) p. 481-484, JACOB M. : *Les nouvelles particules*.N° 589 (1976) p. 273-284, JACOB M. : *Des théories de jauge au charme*.N° 544 (1972) p. 783-853, LAGARRIGUE R. : *La physique des particules*.N° 583 (1976) p. 815-827, OMNÈS R. : *Quelques progrès récents de la physique*.

2) Bulletin de la Société Française de Physique :

N° 22 (1976) p. 2-7, AUBERT B. et JAUNEAU L. : *Les nouvelles particules*.

3) *Europhysics News* :

- Vol. 8 (1-2) (1977) p. 3-7, PREPARATA G. : *J-Psi and the new physics*.
 Vol. 9 (9) (1978) p. 2-3, MUSSET P. : *Quarks, Leptons and Unification*.
 Vol. 9 (10) (1978) p. 13-14, RAHNAMA M. : *Quarks and Jets*.

4) *La Recherche* :

- N° 14 (1971) p. 662-663, CONSTANT J.-L. : *Les partons, nouveau-nés des hautes énergies*.
 N° 32 (1973) p. 246-266, DALAIS L. : *Le renouveau de la physique du neutrino*.
 N° 37 (1973) p. 790-792, PATY M. : *Un pas vers l'unification des théories physiques*.
 N° 43 (1973) p. 265-268, PATY M. : *Particules élémentaires : le 4^{me} niveau quantique*.
 N° 48 (1974) p. 772-775, PATY M. : *L'invariance d'échelle, les violations possibles*.
 N° 56 (1975) p. 466-468, PATY M. : *Le charme : une interprétation des nouvelles particules*.
 N° 63 (1976) p. 15-23, FROISSART M. : *Les interactions fortes*.
 N° 63 (1976) p. 63-65, PATY M. : *Le photon, les leptons et la structure de la lumière*.
 N° 69 (1976) p. 617-627, VELTMAN M. : *Les interactions faibles*.
 N° 70 (1976) p. 767, BARRÈRE M. : *La première particule charmée identifiée*.
 N° 73 (1976) p. 1058-1059, CHOUNET L.-M. : *Course au trésor en physique des particules*.
 N° 74 (1977) p. 5-13, MUSSET P. : *La physique du neutrino*.
 N° 75 (1977) p. 165, PATY M. : *Le charme laisse des traces*.
 N° 80 (1977) p. 878-889, PATY M. : *Voir les quarks*.
 N° 82 (1977) p. 878-880, SCHERK J. : *La physique théorique en quête d'unification*.
 N° 85 (1978) p. 58-59, DALAIS L. : *Combien de quarks*.
 N° 91 (1978) p. 676-678, MUSSET P., VIALLE J.-P. : *Un défi des neutrinos*.
 N° 92 (1979) p. 779-781, PATY M. : *Quand on tue les neutrinos dans l'œuf*.
 N° 96 (1979) p. 66-68, PATY M. : *La double désintégration β* .
 N° 97 (1979) p. 126-135, CROZON M. : *Les accélérateurs de demain*.
 N° 98 (1979) p. 279-280, LONGUEMARE C. DUPAS C. : *A Stanford : mise en évidence d'une nouvelle interaction*.

5) *Scientific American* :

- Jan. 1963, p. 38-47, HILL R.-D. : *Resonance particles*.
 Feb. 1964, p. 74-93, CHEW G.-F., GELL-MANN M. et ROSENFELD A.-H. : *Strongly interacting particles*.

Dec. 1974, p. 108-119, CLINE D.-B., MANN A.-K. et RUBBIA C. : *The detection of neutral weak currents.*

Jun. 1975, p. 50-62, DRELL S.-D. : *Electron-positron annihilation and the new particles.*

Oct. 1975, p. 38-50, GLASHOW S.-L. : *Quarks with color and flavor.*

Apr. 1977, p. 56-70, SCHWITTERS R.-F. : *Fundamental particles with charm.*

Feb. 1979, p. 92-116, REBBI C. : *Solitons.*

6) *Scientia* :

N° 109 (1974) p. 729-748, PATY M. : *L'univers des particules élémentaires.*

7) OMNÈS R. : *Introduction à l'étude des particules élémentaires*, Ediscience 1970.

8) *Rev. Mod. Phys.* 49 (2) (1977) :

p. 235-249, TING S.-C.-C. : *The discovery of the J particle : A personal recollection.*

p. 251-264, RICHTER B. : *From the psi to charm : The experiments of 1975 and 1976.*

p. 297-315, QUIGG C. : *Production and detection of intermediate vector bosons and heavy leptons in pp and pp collisions.*

9) *Fundamenta Scientiae* (Université Louis-Pasteur, Strasbourg) :

N° 14 (1975), PATY M. : *Le charme discret des particules.*

N° 49 (1976), PATY M. : *Symétrie et matière élémentaire ou symétrie et unité et symétries à l'infini, dans la physique actuelle.*

N° 58 (1976), BARACCA A. : *Qu'est-ce qui fait courir les hautes énergies ?*

N° 64 (1976), VANDERMEULEN J. : *Aperçus de la physique des particules élémentaires.*

N° 80 (1978) PATY M. : *Quarks parfumés, colorés, confinés.*

Edmond WEISLINGER,
*Laboratoire de Physique quantique
(Université de Nancy I).*
